引文格式：曹俊, 张志艺, 黄海英. 空中三角测量成果位置精度检测创新方法与实践[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 114-117. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.03.025

空中三角测量成果位置精度检测创新方法与实践

曹　俊[1]，张志艺[1]，黄海英[1]
（1. 湖北省测绘质量监督检验站，湖北 武汉 430074）

摘　要：为快速保障新型基础测绘航空摄影数据质量检验工作，提升大范围空中三角测量成果质检工作效率，结合新型基础测绘空中三角测量成果检查与验收实际案例，探讨了空中三角测量成果位置精度检验的内容与方法；补充细化了内外业检测点采集、位置精度统计等现有检验标准相关内容；分析了影响空中三角测量成果质量的主要因素；针对发现的问题，提出了符合现阶段实际需求的质量控制方法，为后期类似成果质量检验提供了经验借鉴。

关键词：空中三角测量；加密点；检查点
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0114-04

Practice and Innovation of Position Accuracy Inspection of Aerial Triangulation Results

CAO Jun[1], ZHANG Zhiyi[1], HUANG Haiying[1]
(1. Hubei Surveying and Mapping Quality Supervision and Inspection Station, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to quickly guarantee the quality inspection of aerial photography data of new basic surveying and mapping and improve the quality inspection efficiency of large-scale aerial triangulation results, we discussed the content and methods of aerial triangulation result position accuracy inspection based on the actual cases of aerial triangulation result inspection and acceptance of new basic surveying and mapping, supplemented and refined the relevant content of existing inspection standards, including indoor and outdoor inspection point collection, and precision statistics standard process. Then, we analyzed the main factors affecting the quality of aerial triangulation results, and put forward quality control methods that met the actual needs of the current stage according to the problems found, providing experience for the quality inspection of similar results in the later stage.

Key words: aerial triangulation, photogrammetric point, check point

机构改革以来，测绘工作不断融入自然资源管理，切实履行自然资源“两统一”职责，做好技术支撑和数据保障服务。《湖北省基础测绘“十四五”规划》提出加快新型基础测绘体系试点建设与推广[1]，2020年咸宁、武汉分别启动新型基础测绘体系建设国家试点项目，2021年荆门、襄阳试点启动。新型基础测绘采取省、市、县3级联动更新机制，相较于以往的基础测绘制图，具有范围广、参与单位多、工期集中的特点；采用图库一体化采编的新工艺流程，缩短了从数据采集、编辑、质检到入库的周期。湖北省测绘质量监督检验站作为全省基础测绘成果检查验收的专业机构，承担了咸宁试点项目成果质量验收工作，并组织开展了荆门、襄阳全域航空摄影项目检查验收工作。以咸宁试点为例，2021年湖北省测绘质量监督检验站参与了18个标段累计9 000余km^2的1∶500~1∶2 000比例尺DLG、DEM、DOM、实景三维模型等产品的质检验收工作，其中1∶2 000 DEM、DOM、DLG实现了全市域覆盖。在新型基础测绘体系下，数据量急剧增长，对现行以“图幅”为单位开展野外实测检测精度的方式提出了较大挑战，急需采用新的抽样检验方法。

1　空中三角测量成果检验内容与方法

1）抽样检验内容。空中三角测量成果抽样检验的内容与方法如表1所示。

2）检验重点和难点。空中三角测量成果质量检查中“数据质量”元素权重可达0.6，包括数学基础、平面位置精度、高程精度、接边精度和计算质量4项内容，是空中三角测量成果质检的重难点内容。根据检验规范[3]要求，可采用实地采集的检查点数据

收稿日期：2022-07-05；修回日期：2022-12-08。
第一作者简介：曹俊（1986—），硕士研究生，工程师，主要从事测绘地理信息成果质量检验与评价应用研究，E-mail：caojun_whu@126.com。

表1　空中三角测量成果抽样检验内容与方法

检验内容[2]	检验方法
数据质量（平面位置精度、高程精度）：内业加密点的平面位置精度和高程精度	内业采用受检单位提供的外业检测数据进行精度统计，检查空中三角测量成果的平面位置精度和高程精度
布点质量：平面控制点和高程控制点是否超基线布控，定向点、检查点设置的合理性、正确性，加密点点位选择的正确性、合理性	内业检查平面和高程控制点、定向点、检查点、加密点选择的正确性、合理性
附件质量：附件资料的齐全性、规整性以及点位略图的符合性	内业检查成果的附件质量（附件资料的齐全性、规整性以及点位略图的符合性）

或从高精度成果数据中内业采集的检查点数据计算平面高程中误差，以此判定成果质量。然而，如何高效、准确采集检测点数据，并兼顾随机性、代表性，规范未给出具体指导，需在检验过程中根据实际情况确定。

本文结合新型基础测绘空中三角测量成果质量检查与验收项目实践，参考地形图质量检查规范中关于平面和高程精度检测的相关要求，对空中三角测量成果位置精度检测的方法进行了明确和创新。结合空中三角测量成果的表现形式，提出了检查点分布和数量要求、检查点采集的对象、采集方式、数据格式（包括检测点存储规则、数据精度要求、照片或截图要求）等内容，形成了统一的检验技术方法和流程。

2　位置精度检测方法创新

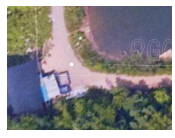
2.1　检查点采集数量

结合检验项目的实际生产方式，通过核查空三解算报告，在空三解算内符合精度各项指标满足要求的前提下，以空三加密平差区域网为抽样检验单元进行外符合精度检测，按抽样分区采集外业平面检查点和高程检查点。每个抽样单元一般采集指定类型的检查点20~30个。

2.2　检查点采集对象

采集对象应兼顾多种地物类型，均匀分布。根据抽样分区情况，在抽样加密区范围内随机、均匀选取检查点，检查点类型涵盖居民地、道路交通、耕地、植被等地物类型，高程点避免选择高程急剧变化处。检查点分为平面检查点、高程检查点和平高检查点。平面检查点选取线性地物交叉点，如街道中心线交叉点或边界交叉点、田埂中心线交叉点或边界交叉点等；明显地物角点，如道路交通标志线交叉点或角点、水泥地块角点、广场地砖边界线交叉点、球场明显拐点等；建筑物角点，如建筑物主要角点、低矮房屋房檐外边缘角点、围墙角点；管线中心点，如明显检修井盖中心点等。除采集的平面检查点可同时检测高程外，每个区要单独采集多个田块内的高程检查点。空中三角测量成果检查点选择如表2所示。

表2　空中三角测量成果检查点选择示意图

类型	检查点选择示意图	
平面检查点		
	农房前水泥地块明显拐角1	农房前水泥地块明显拐角2
		
	跨河桥栏杆端点处	道路边线明显交叉点
高程检查点		
	水田地块中间点	平坦旱地地块中间点
		
	农村居民房屋前空地点	道路中线点

2.3　检查点采集方法

空中三角测量成果检查点采取内业模型采集与外业实测相结合的方式采集，首先内业在立体模型上选点，然后到外业实地测量，内业截图，外业拍照。为便于外业到达，节省巡点时间，内业模型刺点综合考虑了外业交通情况，预先开展了路径规划。在内业刺点后将点号叠加显示后截图，作为外业巡点的依据。

2.3.1　检查点内业采集方法

1）获取两张内业检查点位截图。在摄影测量工作站打开立体模型影像，在模型上选取内业检查点，并将检查点点号标注在图面，符号化显示为“红色十字丝或红色小圆圈+红点”，缩放影像到能明显显示检测地物与周边环境的地理位置关系为宜，截取511×511像素尺寸的图片，以检查点唯一编号命名图片文件，即“测区名+区号+MXD+顺序号+局部JT.jpg”；再缩小比例尺，截取概览图，命名为“测区名+区号+MXD +顺序号+概览JT.jpg”。

2）内业完成检查点采集后，导出模型点文件。内业检测点记录格式为“内业检查点号，北坐标x，

东坐标y，85高程，检查点类型代码”。检查点类型代码以“程”代表平面检查点，“表平”代表高程检查点，“表高程”代表平高检查点。

2.3.2 检查点外业采集方法

1）拍摄地面实景照片两张。外业实地采集检查点时，拍摄检查点的现场照片，以检查点唯一编号命名照片文件，即“测区名+区号+RTK+顺序号+近景SJ.jpg”，远景为“测区名+区号+RTK+顺序号+远景SJ.jpg”。RTK采集检查点的记录格式为“外业检查点号,纬度,经度,大地高,检查点类型代码”。

2）经纬度采用度分秒的形式，保留至少9位小数，纬度为DD.MMSSSSSSS，经度为DDD.MMSSSSSSS，大地高扣除天线高归算至测杆底部，保留3位小数。

2.4 精度统计方法

1）内业平面位置误差计算。求取外业采集的平面检查点坐标与内业模型上量取对应检查点坐标的误差距离 Δs，并记录较差值。

2）内业高程误差计算。求取外业采集的高程检查点与内业量取的同名高程检查点高程值较差 Δh。

3）平面、高程中误差统计统一按“高精度”统计，超过两倍中误差限差视为粗差，粗差不参与中误差计算，计算粗差比率。

4）统计平面中误差、高程中误差。当检查点个数（除粗差外）超过20个，中误差计算公式为 $M=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}\Delta_i^2}{n}}$（$n$为检测抽样单元内检查点数量，$\Delta_i$为第$i$个误差）；当检查点个数不足20个，则以误差的算术平均值代替中误差。

3 检验案例分析

3.1 检验任务概况

荆门市全域国土面积为1.24万km^2，襄阳市全域国土面积为1.97万km^2，两市在地理位置上相邻，包括平地、丘陵、山地、高山地等多种地形。根据精度、保密要求，航摄划分为通航、无人机、卫星影像等多种航摄遥感方式获取影像资料的区域类型。湖北省测绘质量监督检验站按照GB/T 24356–2009《测绘成果质量检查与验收》等相关规范规定的抽样检查程序和检验内容，结合本文提出的位置精度检测技术方法，开展内、外业质量检查和质量评定。

3.2 样本区域选择

空中三角测量成果以航摄和空三加密区域网平差划定的分区范围为抽样单元[3]，本案例共74个空三加密区。根据项目生产进度、航摄平台的不同，兼顾地形类别，遵循简单随机抽样原则，分4个批次开展检查验收，共抽取9个空三加密区作为样本进行内、外业检查。

3.3 精度统计结果分析

1）无人机空三加密区精度情况。抽取的无人机空三加密区地形以丘陵为主，个别为山地，共采集平面检查点152个，平均每个区25个，平面位置中误差均值为0.18 m，最大值为0.2 m，无超限值；高程检查点201个，平均每个区33个，高程中误差均值为0.25 m，最大值为0.29 m，高程超限1倍中误差的13个，占比为6.5%，无超两倍中误差的情况。通过比对分析可知，无人机空三加密区平面、高程精度均符合规范和技术要求。

2）通航空三加密区精度情况。抽取通航空三加密区1个，丘陵地形，共采集平面检查点24个，平面位置中误差为0.36 m，平面误差均未超限；采集高程检查点31个，高程中误差为0.26 m，超1倍中误差的两个，占比为6.5%，无超两倍中误差的情况。通过比对分析可知，通航空三加密区平面、高程精度均符合规范和技术要求。

3）卫星影像空三加密区精度情况。抽取卫星影像空三加密区两个，山地地形，共采集平面检查点43个，平面位置中误差均值为0.75 m，最大误差为1.64 m，无超限值；高程检查点59个，高程中误差均值为0.58 m。两个抽样区差别相对较大，其中8个检查点高程误差超1倍中误差，个别抽样区高程检查点存在超两倍中误差的情况，占比分别为13.6%和1.7%。通比对分析可知，卫星影像空三加密区平面、高程精度均符合规范和技术要求。

4 影响因素分析与建议

4.1 空中三角测量成果影响因素分析

空中三角测量成果质量由多个生产工序质量控制环节决定。航空摄影环节包括飞行平台的稳定性、航测相机几何畸变的可控性以及航线的规划合理性[4]、像控点布设规范性、合理性[5–7]等；而在空三加密解算环节，包括定向点、加密点的选择，区域网平差参数控制等，均应满足相应的规范。本案例中无人机、通航采用相同的地面分辨率、影像重叠度，空三加密区平面、高程精度水平总体相近；但由于二者采用的飞行平台不同、搭配的航摄仪成像质量差异，无人机影像尺寸相对较小，像控点布设更密集，无人机分区平

面位置精度总体略优于通航分区。

4.2　对遗留问题的建议

目前空三加密软件自动化程度较高，出现偶然误差的可能性较低，因此样本空三加密区内符合精度得到较好控制，但整个市域范围内的外符合性仍必须通过布设外业检查点进行质量控制，当以空三加密区为抽样单元开展位置精度检测时，每个检查点均反映出该点所在加密区局部的外符合性，即与湖北省地理空间时空坐标基准的一致性程度。平面、高程中误差达标，但个别检查点误差超限的异常情况尤其需要注意，应通过增加外业控制点、检查点重新解算的方式提升外符合精度。例如，本文中个别卫星影像空三加密区高程检查点存在超两倍中误差的情况，由于卫星影像幅面较宽，图幅内部成图几何畸变相较于无人机或机载量测相机不可控，且成图范围位于山地等困难地区，在超限点所在卫星影像范围内，应通过增加外业控制点、检查点等形式，重新开展空三加密计算，以达到提升位置精度质量的目的。

本文提出了统一的检测数据采集标准，明确了检查点的选取对象、数量、分布和格式等要求。检测点数据采集具有代表性、随机性，能客观反映成果位置精度水平。内业预先的路径规划能指导外业人员快速导航定位到实地点位，提升数据采集效率。通过复用平面、高程点可节省检验时间和人力成本。

以荆门、襄阳空中三角测量成果质量检验为例，在9个抽样区共采集219个平面控制点、291个高程控制点，其中部分点为平高点，两个地市空三加密范围采集外业检查点不足500个，位置精度检测任务在两周内完成，以较快的时间周期实现了两个地市全域范围空中三角测量成果的质量检验，满足了新型基础测绘对质量检验的时效性要求，达到了质量检验效果，为后续全省新型基础测绘同类项目验收积累了经验。

参考文献

[1] 湖北省自然资源厅. 湖北省基础测绘“十四五”规划[Z]. 武汉:湖北省自然资源厅,2021

[2] 测绘成果检查与验收:GB/T 24356-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009:29-30

[3] 空中三角测量成果检验技术规程:CH/T 1039-2018[S]. 北京:测绘出版社,2018:1

[4] 1∶500 1∶1 000 1∶2 000地形图航空摄影测量外业规范:GB/T 7931-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008:2-5

[5] 王瑜,周松,高文涛,等. 低空GPS辅助空中三角测量精度分析[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(12):190-192

[6] 康荔,蔡磊,王薇,等. 空中三角测量对无人机航测成图精度影响分析[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(2):84-86

[7] 廖玉祥,吴洪宪. 不同像控布设方案在航片DOM生产中的应用研究[J]. 地理空间信息,2022,20(6):106-109

(上接第105页)

影像产品，从而降低遥感数据应用门槛，将卫星遥感数据从有用、好用推向善用、足用。平台正式上线后，将针对不同业务场景、不同用户需求，提供多级别影像产品、地图服务等数据资源以及数据分析、数据应用服务，能更快、更精准地支撑自然资源领域以及其他行业在卫星数据应用方面的需求，从而全面提升全省卫星影像数据的管理与应用服务水平。

参考文献

[1] 国家测绘地理信息局关于印发《测绘地理信息科技发展“十二五”规划》的通知:国测科发[2012]2号[S].

[2] 吕雪锋,程承旗,龚健雅,等. 海量遥感数据存储管理技术综述[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(12):1 561-1 573

[3] 李德仁. 论21世纪遥感与GIS的发展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(2):127-131

[4] 王恺. 遥感影像数据时空云服务系统建设研究[J]. 地矿测绘,2021,37(2):30-34

[5] Golpayegani N, Halem M. Cloud Computing for Satellite Data Processing on High End Compute Clusters[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Cloud Computing. USA: IEEE Computer Society, 2009: 88-92

[6] 任伏虎,王晋年. 遥感云服务平台技术研究与实验[J]. 遥感学报,2012,16(6):1 331-1 346

[7] 王宇翔,廖通逵,马海波,等. 时空遥感云服务平台(PIE-Engine)研发及应用[J]. 中国科技成果,2021,22(21):76-77

[8] 刘异,冯维,江万寿,等. 一种基于云计算模型的遥感处理服务模式研究与实现[J]. 计算机应用研究,2009,26(9):3 428-3 431

[9] 武云龙,王思勇,李新楼. 基于云计算的遥感数据处理模型的设计与实现[J]. 电脑知识与技术,2010,6(14):3 646-3 648

[10] 梁思,厉芳婷,谢宝发,等. 浅谈自然资源卫星应用技术现状与发展[J]. 地理空间信息,2021,19(9):38-40